

## Tinjauan Teknik Isotop dan Radiasi Dalam Penyelidikan Potensi Sumber Daya Air

### *Review of Isotope and Radiation Techniques in Water Resources Investigations*

Paston Sidauruk

Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi, BATAN  
e-mail : pastons@batan.go.id

Diterima 11 Juli 2012; Disetujui 10 Oktober 2012

#### ABSTRAK

**Tinjauan Teknik Isotop dan Radiasi Dalam Penyelidikan Potensi Sumber Daya Air.** Aplikasi teknik isotop dalam penyelidikan sumber daya air baik sumber air permukaan, air tanah, maupun interaksi antara air permukaan dengan air tanah telah berkembang baik khususnya pada empat dekade terakhir. Teknologi ini dalam perannya sebagai salah satu metode penyelidikan dalam masalah hidrologi secara bersama-sama dengan teknik hidrologi lainnya maupun secara independent sudah terbukti dapat menjawab beberapa masalah yang berkaitan dengan pengelolaan sumber daya air. Di Indonesia, teknologi isotop ini telah banyak diaplikasikan diantaranya untuk: penelitian daerah imbuh cekungan air tanah, umur air tanah, penyelidikan pola dinamika dan neraca air waduk atau danau, interaksi antara air tanah dan air permukaan, debit air permukaan, penelitian interkoneksi antara sistem sungai bawah tanah di daerah karst, dan keselamatan bendungan. Dalam dua studi kasus yang dibahas dalam makalah ini yaitu penyelidikan asal usul air keluaran ditubuh bendungan Wlingi, Jawa Timur, dan lokasi bocoran di Bendungan Ngancar, Jawa Tengah, menunjukkan bahwa teknik isotop ini terbukti mampu menjawab masalah yang dihadapi secara efektif dan efisien.

**Kata kunci :** isotop alam, isotop buatan, sumber daya air, air tanah, air permukaan.

#### ABSTRACT

**Review of Isotope and Radiation Techniques in Water Resources Investigations.** Isotope techniques applications in investigation of water resources potential has grown increasingly especially for the last 4 decades. Isotopes techniques have played its role as an independent tool or together with other conventional techniques to answer several water resources investigations. In Indonesia, this techniques have been applied to a variety of problems for both surface water and groundwater such as: elevation of recharge area of groundwater, groundwater dating, water dynamic and balance of reservoirs and lakes, groundwater and surface water interconnections, open channel flow rate, caves interconnection in karst area, and dam sustainability and safety problems studies. Two case studies presented in this paper, i.e., discharge waters origin around Wlingi dam and ingres point of leakage in Ngancar dam, have proved that isotopes techniques can solve these problems in effective and efficient ways.

**Key words :** natural isotopes, artificial isotopes, water resources, groundwater, surface water.

#### PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk dan kegiatan industri yang berkembang dengan pesat menimbulkan konsekuensi peningkatan

tajam kebutuhan akan air. Di samping itu, peningkatan kesejahteraan manusia juga memperbesar jumlah kebutuhan air perkapita. Dilain pihak, jumlah air yang dapat dikelola untuk memenuhi kebutuhan

air tersebut adalah tetap dan bahkan jumlah air yang tetap tersebut masih mengalami tekanan tambahan karena beberapa proses baik proses alam ataupun yang berhubungan dengan kegiatan manusia seperti pencemaran dan intrusi air laut. Pengambilan air secara berlebihan (*overexploitation*) diatas kapasitas amannya (*safe yield*) telah terjadi di banyak tempat. Pengambilan air secara berlebihan telah menimbulkan banyak masalah diantaranya penurunan muka air tanah yang diikuti oleh penurunan muka tanah (*subsidence*), peningkatan laju intrusi air laut, dan pencemaran. Dengan demikian perlu langkah langkah penerapan pengelolaan sumber daya air yang ada secara terpadu, efisien dan berkelanjutan (*sustainable*). Semua komponen air dalam siklus hidrologi yang tersedia untuk pemenuhan kebutuhan manusia seperti air danau, sungai, air tanah harus dikelola secara terpadu. Seluruh potensi komponen hidrologi ini harus diidentifikasi untuk menghindari penggunaan yang berlebihan dan untuk menjamin keberlanjutan ketersediaan air.

Salah satu teknologi yang tersedia dan sudah berkembang khususnya pada empat dekade terakhir adalah teknologi isotop. Sifat fisik dan kimia dari isotop dari suatu unsur kimia yang unik baik yang terdapat di alam secara alamiah maupun yang ditambahkan ke sistem hidrologi sesuai dengan tujuan pekerjaan memungkinkan teknologi ini dapat mengidentifikasi beberapa parameter penting dalam pengelolaan sumber daya air seperti: daerah imbuh cekungan air tanah, umur air tanah, pola dinamika dan neraca air waduk/danau, interaksi antara air tanah dan air permukaan, debit air permukaan, interkoneksi antara sistem sungai bawah tanah di daerah karst, interaksi airtanah dalam dan dangkal dan keselamatan bendungan. Teknologi isotop secara umum dapat dibagi dua yaitu, yang didasarkan pada variasi komposisi isotop alam yang terdapat dalam sistem yang dipelajari, dan dengan menggunakan radioisotop buatan [1, 2].

## TEKNIK ISOTOP

### Teknik isotop alam

Isotop alam adalah isotop dari unsur kimia yang terdapat secara alamiah di alam. Isotop alam yang paling penting dalam hidrologi adalah isotop dari atom pembentuk molekul air itu sendiri yaitu isotop dari atom hidrogen:  $^1\text{H}$ ;  $^2\text{H}$  (deuterium, D);  $^3\text{H}$  (Tritium, T), dan isotop dari atom Oksigen ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ). Kelimpahan isotop hidrogen di alam adalah sekitar  $^1\text{H}=99,985\%$ ;  $^2\text{H}$  (D)= $0,015\%$ ; dan  $^3\text{H}$  (T)(radioaktif) $<0,001\%$ . Sedangkan kelimpahan isotop oksigen adalah :  $^{16}\text{O}=99,63\%$ ;  $^{17}\text{O}=0,0375\%$ ; dan  $^{18}\text{O}=0,1995\%$  [1]. Dari kelimpahan isotop ini dapat dilihat bahwa molekul air yang paling dominan adalah:  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  (massa-18),  $\text{HD}^{16}\text{O}$  (massa-19), dan  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  (massa-20). Dalam aplikasi, kelimpahan molekul ini dalam air tidak diukur secara mutlak tetapi yang diukur adalah kelimpahan relatif terhadap suatu standar. Kelimpahan relatif molekul  $\text{HD}^{16}\text{O}$  disebut dengan kelimpahan relatif deuterium ( $\delta_D$ ), dan kelimpahan relatif  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  disebut dengan kelimpahan relatif oksigen-18 ( $\delta_{O-18}$ ). Kelimpahan relatif deuterium dan kelimpahan relatif oksigen-18 di air diukur relatif terhadap suatu standar internasional SMOW (Standard Mean Ocean Water), dengan rumus sebagai berikut:

1. Kelimpahan 128relatif deuterium ditulis dengan ( $\delta_D$ ) dengan rumus [1,3]:

$$\delta_D = \left( \frac{R_{D(\text{contoh})}}{R_{D(\text{s tan dar})}} - 1 \right) \times 1000 \text{‰}$$

2. Kelimpahan 128relative oksigen-18 ( $\delta_{O-18}$ ) dengan rumus [1,3]:

$$\delta_{O-18} = \left( \frac{R_{O-18(\text{contoh})}}{R_{O-18(\text{s tan dar})}} - 1 \right) \times 1000 \text{‰}$$

Dimana  $R_D$  dan  $R_{O-18}$  adalah perbandingan antara kelimpahan molekul  $\text{HD}^{16}\text{O}$  dan  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  terhadap molekul  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ .

Hubungan antara kelimpahan deuterium ( $\delta_D$ ) dan oksigen-18 ( $\delta_{O-18}$ ) suatu contoh air telah dibuktikan oleh para ahli adalah linear dan ditulis dengan persamaan :  $\delta_D = A \delta_{O-18} + B$ . Sebagai contoh untuk air hujan yang diperoleh dari 91 stasiun bumi seluruh dunia diperoleh hubungan:  $\delta_D = 8 \delta_{O-18} + 10$  dan selanjutnya disebut dengan *Global Meteoric Water Line (MWL)* [1, 3]. Hubungan antara kelimpahan relatif deuterium dan oksigen-18 dan variasinya sebagai fungsi waktu dan lokasi memungkinkan para peneliti dibidang hidrologi untuk mempelajari karakteristik (parameter) suatu sistem sumber daya air diantaranya elevasi daerah imbuh cekungan air tanah, dan interaksi antara air tanah dan air permukaan.

Di lain pihak, walaupun kelimpahan isotop tritium di alam sangat kecil <0,001% tetapi karena isotop ini bersifat aktif dengan waktu paruh 12,39 tahun maka isotop ini adalah sangat penting khususnya dalam penentuan umur air yang diteliti [1, 2, 3, 5].

Selain isotop molekul air disebut di atas, isotop dari garam terlarut seperti  $^{13}C$ ,  $^{14}C$ , dan  $^{34}S$  juga adalah penting. Isotop  $^{14}C$  dapat mengungkap umur dari air atau batuan yang diteliti sedangkan  $^{13}C$  dan  $^{34}S$  dapat digunakan sebagai perunut diantaranya untuk mempelajari asal-usul pencemaran. Kelimpahan relatif isotop alam  $^{13}C$  adalah perunut yang sangat penting dalam penelitian perubahan iklim dalam kaitannya dengan persediaan sumber daya air [8]. Sebagai contoh Ghosh, dan Brand, telah mendapatkan kenaikan kelimpahan  $^{13}C$  sebesar 1500 ppm di atmosfer yang diakibatkan oleh kenaikan suhu rata-rata bumi jika dibandingkan 200 tahun sebelumnya [7].

### Teknik isotop buatan

Isotop buatan adalah isotop yang dibuat di dalam reaktor nuklir. Penembakan neutron yang dilakukan dalam teras reaktor terhadap isotop stabil mengakibatkan isotop tersebut menjadi tidak stabil (aktif). Untuk mencari kestabilan baru isotop tersebut memancarkan radiasi gamma, beta dan/atau

partikel alpha. Aktifitas radiasi dari radioisotop akan berkurang secara alami. Laju pengurangan aktifitas isotop ini berbeda antara satu isotop dengan isotop yang lain. Waktu yang dibutuhkan oleh isotop untuk mengurangi aktifitasnya menjadi setengah dari aktifitas awal disebut dengan waktu paruh.

Aktifitas pancaran radiasi dari radioisotop dapat dipantau dan diukur dengan alat detektor. Keberadaan alat detektor yang dapat mendeteksi aktifitas radiasi yang dipancarkan oleh radioisotop dengan sensitifitas tinggi secara *insitu* membuat radioisotop menjadi perunut penting dalam hidrologi.

Sesuai dengan perannya yang harus mewakili dinamika air yang diteliti, maka perunut radioaktif yang digunakan harus memenuhi beberapa syarat diantaranya:

1. dapat bercampur dengan mudah dengan air dan mempunyai sifat dinamika seperti air,
2. sifat fisis dari perunut tidak berubah oleh kondisi yang berbeda,
3. tingkat toksitas atau radio-toksitas dari perunut berada dalam tingkat yang relatif rendah (yang diizinkan),
4. penanganannya relatif mudah,
5. tersedia dalam jumlah yang cukup dengan kontinuitas terjamin. [2, 5, 6]

Beberapa perunut yang biasa digunakan pada penelitian yang berhubungan dengan pengelolaan sumber daya air yang memenuhi syarat tersebut diatas bersama dengan waktu paruh dan konsentrasi maksimum yang diizinkan (*MPC*) diberikan dalam Tabel 1.

## PENERAPAN DALAM PENYELIDIKAN POTENSI SUMBER DAYA AIR

### Teknik isotop alam

Teknik isotop dan radiasi dapat digunakan sebagai perunut untuk mengidentifikasi berbagai masalah hidrologi dengan mempertimbangkan beberapa fenomena seperti:

1. Komposisi isotop alam dari sumber air pada daerah tertentu akan tergantung pada beberapa faktor seperti ketinggian (*altitude effect*), jarak dari garis katulistiwa (*latitude effect*), jarak dari garis pantai, suhu rata-rata tahunan daerah itu.
2. Kelimpahan relatif isotop berat dari contoh air yang telah mengalami proses penguapan adalah lebih tinggi (*enrich*) dibandingkan dengan contoh air yang belum mengalami penguapan.
3. Komposisi isotop air tanah adalah konservatif dengan kata lain perubahan komposisi isotop alam dari air tanah dapat terjadi jika berinteraksi dengan sistem air tanah lainnya atau batuan yang dilalui.

Utara, Bali, dan Nusa Tenggara Barat. Salah satu dari penelitian tersebut disajikan dalam makalah ini yaitu penelitian asal-usul air keluaran yang terdapat disekitar bendungan Wlingi, Blitar-Jawa Timur [4].

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa kelimpahan relatif deuterium ( $\delta_D$ ) dan oksigen-18 ( $\delta_{O-18}$ ) mempunyai hubungan linear. Lebih jauh, gradien garis linear antara kelimpahan relatif deuterium untuk air hujan atau airtanah sebelum mengalami penguapan adalah berkisar 8. Untuk Indonesia para peneliti di BATAN melalui beberapa stasiun penadah hujan di beberapa tempat di Indonesia diperoleh hubungan berikut :  $\delta_D = 8 \delta_{O-18} + 14$  [4]. Selanjutnya persamaan ini diadopsi menjadi persamaan garis meteorik lokal dalam penelitian ini.

**Tabel 1.** Perunut Radioisotop Dalam Penelitian Hidrologi [2, 5, 6]

Isotop	Waktu-paruh	MPC( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ )
Tritium	12,39 tahun	$3 \times 10^{-3}$
Carbon-14	5568 tahun	$8 \times 10^{-4}$
Bromine-82	35,87 jam	$4 \times 10^{-5}$
Iodine-131	8,07 hari	$2 \times 10^{-5}$
Gold-198	2,7 hari	$5 \times 10^{-5}$
Chromium-51	27,8 hari	$2 \times 10^{-3}$

Penelitian yang berkaitan dengan pengelolaan sumber daya air dengan menggunakan Teknik isotop alam di Indonesia seperti penelitian penentuan daerah imbuh cekungan air tanah, umur air tanah, pola pergerakan air tanah, dinamika air waduk, interkoneksi antara air tanah dengan airpermukaan, dan keselamatan bendungan telah banyak dilakukan. Penelitian tersebut pada umumnya dilakukan dengan bekerja sama dengan pemangku kepentingan seperti Pemerintah Daerah, Instansi Pemerintah, Universitas, BUMN, perusahaan swasta dan pemerhati lainnya. Penelitian tersebut telah mencakup beberapa propinsi diantaranya DKI Jakarta, Banten, Jawa Barat, Jawa Tengah, Daerah IstimewaYogyakarta, Jawa Timur, Sumatera

Perubahan gradien dari persamaan antara  $\delta_D$  vs  $\delta_{O-18}$  dari nilai 8 menunjukkan adanya proses yang telah dialami oleh air tersebut seperti penguapan atau interaksi dengan air yang lain atau batuan yang dilalui.

Untuk suatu contoh air yang telah mengalami penguapan seperti halnya air waduk biasanya akan mengalami fraksionasi yang mengakibatkan harga gradiennya menjadi lebih kecil dari 8. Fraksionasi ini dalam penguapan terjadi diakibatkan oleh perbedaan berat molekul air. Pada proses penguapan, molekul air yang lebih ringan mempunyai kemungkinan yang lebih besar untuk menguap dibandingkan dengan molekul yang lebih berat. Sebagai contoh, pada penelitian yang dilakukan di laboratorium dengan suhu rata-rata 30 °C

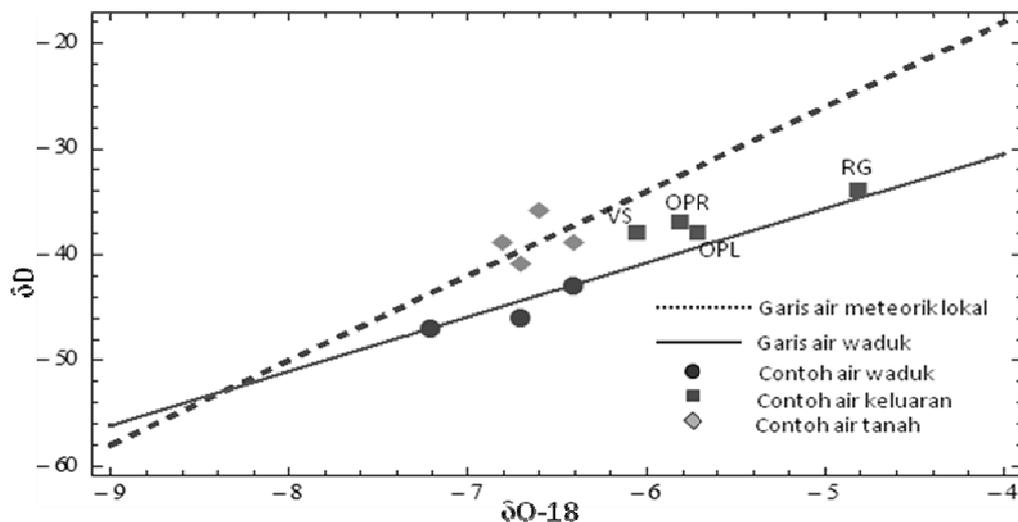
dan kelembaban relatif 57 %, garis hubungan antara  $\delta_D$  vs  $\delta_{O-18}$  diperoleh sbb:  $\delta_D = 4,54 \delta_{O-18} - 10,17$  [9].

Dari analisis kelimpahan deuterium dan oksigen-18 dari air waduk, air hujan dan air sumur penduduk/mata air maka akan diperoleh informasi apakah air keluaran tersebut berasal dari air waduk atau dari air tanah setempat atau merupakan percampuran dari air waduk dan air tanah setempat. Dari hasil pengamatan dan pengambilan contoh secara berkala akan dapat dibuat suatu grafik antara  $\delta_D$  dan  $\delta_{O-18}$  yang memuat garis reservoir dan garis air meteorik lokal dan titik air keluaran.

Bendungan Wlingi, yang berlokasi sekitar 8 Km dari kota Blitar-Jawa Timur adalah bendungan serba guna dengan tipe *earth fill*. Di sekitar bendungan terdapat beberapa air keluaran yang dicurigai berasal

contoh air yang dikumpulkan dari waduk; dan garis air meteorik lokal adalah garis hubungan antara  $\delta_D$  dan  $\delta_{O-18}$  dari contoh air hujan. Gambar 1 di bawah ini menunjukkan garis waduk, air meteorik lokal bersama sama dengan data isotop dari contoh air keluaran yang dikumpulkan.

Terlihat jelas dalam Gambar 1 bahwa air keluaran disekitar bendungan yang mempunyai kode contoh VS, OPR, OPL, dan RG memang mempunyai indikasi kuat berasal air waduk. Kesimpulan ini diambil karena komposisi isotop stabil contoh air tersebut (deuterium dan oksigen-18) seperti terlihat dalam Gambar 1 lebih condong ke garis air waduk. Kesimpulan ini diperkuat dari hasil observasi dan informasi yang kami dapatkan bahwa ada keterhubungan debit air keluaran sumur tersebut dengan ketinggian muka air di dalam reservoir.



**Gambar 1.** Grafik antara kelimpahan relatif deuterim vs oksigen-18 contoh air waduk, airtanah dan air keluaran.

dari air bocoran dan resapan dari reservoir bendungan. Salah satu teknik yang tersedia untuk menentukan asal-usul air keluaran tersebut adalah teknik perunut isotop alam seperti diterangkan di atas. Dari hasil pengamatan secara berkala selama 6 bulan, maka dapat digambarkan garis waduk dan garis air meteorik lokal. Garis waduk adalah garis hubungan antara  $\delta_D$  dan  $\delta_{O-18}$  dari

### Teknik isotop buatan

Sebagaimana halnya penelitian dengan teknik isotop alam, penelitian dengan menggunakan isotop buatan juga telah banyak dilakukan diantaranya untuk penelitian kebocoran bendungan, penelitian interkoneksi sumur pantau, sumur produksi, dan sumur injeksi pada lapangan produksi, *waterflood*, arah aliran dengan sumur tunggal

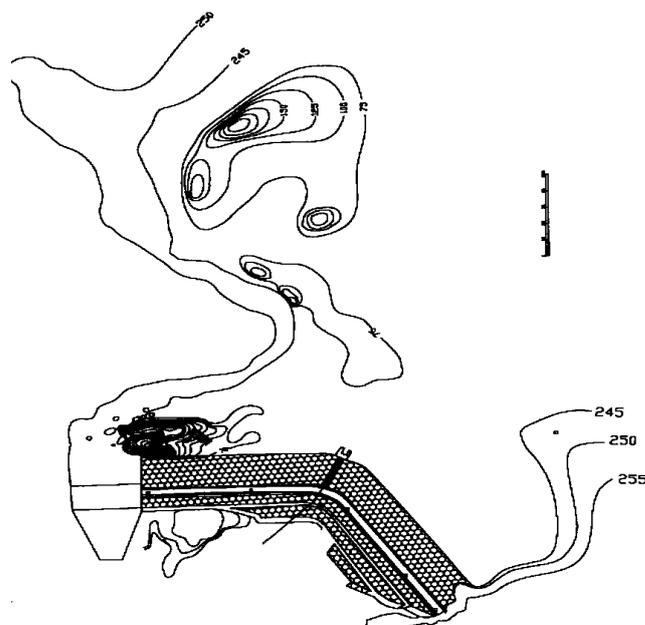
atau ganda. Suatu langkah krusial dalam penelitian ini adalah pemilihan isotop dan jumlahnya. Pemilihan isotop harus disesuaikan dengan jenis pekerjaannya. Pada pekerjaan interkoneksi sumur pantau maka isotop yang dipilih adalah isotop yang tidak dapat terserap oleh butiran padat dari media yang dilaluinya. Dilain pihak, pada pekerjaan/penelitian identifikasi bocoran pada dasar waduk, isotop yang dipilih harus dapat terserap dengan mudah oleh butiran padat dari media yang dilalui untuk memudahkan penjejukan (tracking). Sedangkan besar dari isotop yang digunakan harus dihitung dengan memperhatikan faktor keamanan, luas/besar pekerjaan, lamanya pekerjaan, dan batas minimum deteksi alat.

Dalam makalah ini salah satu penelitian terdahulu tentang kebocoran bendungan disajikan sebagai contoh aplikasi. Teknik ini seperti telah disinggung pada awal tulisan ini sangat bermanfaat untuk menentukan lokasi kebocoran di dasar waduk. Prinsip pelaksanaan pekerjaan ini adalah dengan me-label (menandai) air waduk atau sebagian dari air waduk pada

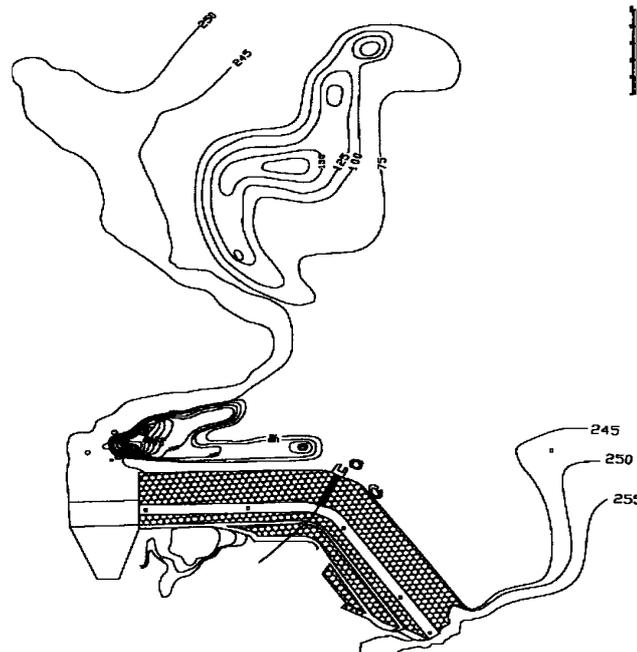
tempat yang dicurigai dengan zat perunut radioaktif.

Penelitian kebocoran bendungan Ngancar di Wonogiri telah dilakukan dengan teknik perunut radioisotop yang dilakukan pada bulan Maret-April 1997. Sesuai dengan jenis pekerjaan yang akan dilakukan, dalam pekerjaan ini perunut radioaktif yang dipilih adalah  $Au^{198}$  dalam senyawa  $AuCl_3$ . Adapun sifat-sifat perunut radioisotop  $Au^{198}$  diantaranya adalah: batas deteksi minimum ( $MDL$ ) =  $1 \times 10^{-7} \mu Ci/cc$ ; konsentrasi maksimum yang diizinkan ( $MPC$ ) =  $5 \times 10^{-5} \mu Ci/cc$ ; energi  $\gamma$  yang dipancarkan = 0,41 Mev. Sedangkan volume air waduk diperkirakan sebesar  $1.000.000 m^3$ ; dan lama pekerjaan diperkirakan sekitar 7 hari. Dari data ini ditetapkan besar radioaktif yang akan diinjeksikan adalah sebesar 2 Ci dengan demikian selama pekerjaan diperkirakan konsentrasi radioisotop rata-rata dalam waduk berkisar antara  $2 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-7} \mu Ci/cc$ .

Radioisotop  $Au^{198}$  dengan aktifitas 2 Ci diinjeksikan ke dalam waduk pada tanggal 28 Maret 1997. Pengukuran konsentrasi radioisotop yang terabsorpsi di dasar



Gambar 2. Peta iso-kontur hasil cacahan 29 Maret 1997 bendungan Ngancar



**Gambar 3.** Peta iso-kontur hasil cacahan 1 April 1997 bendungan Ngancar

reservoir mulai dilakukan sehari setelah injeksi. Hasil penggambaran iso-kontur dari pengukuran tersebut diantaranya dapat dilihat di bawah ini yaitu hasil pengukuran pada tanggal 29 Maret dan 1 April 1997. Gambar 2 (iso-kontur cacahan radioisotop pada tanggal 29 Maret 1997) menunjukkan pergerakan radioisotop tersebut ke arah sisi kanan waduk. Gambar 3 menunjukkan iso-kontur cacahan radioisotop tiga hari kemudian. Pada Gambar 3, pola yang sama masih terjadi yaitu pergerakan radioisotop ke sisi kanan waduk dan mengerucut pada 2 daerah. Dua daerah dimana iso-kontur dari cacahan radioisotop mengerucut adalah daerah bocoran. Kesimpulan ini diambil karena selama pekerjaan seluruh pintu luaran ditutup dengan demikian pergerakan air hanya diakibatkan oleh gerakan air ke arah bocoran. Hasil ini telah ditindak lanjuti oleh pemilik bendungan yaitu Departemen Pekerjaan Umum yaitu dengan melakukan perbaikan pada tempat yang direkomendasikan dan hasilnya sangat memuaskan yaitu tingkat kehilangan air oleh kebocoran dapat dikurangi dengan sangat nyata setelah perbaikan.

## KESIMPULAN

1. Teknik isotop dan radiasi baik yang alam maupun buatan adalah suatu teknik yang dapat digunakan untuk memecahkan beberapa masalah dalam bidang hidrologi seperti: neraca air, asal-usul air tanah, interaksi airtanah dengan air permukaan, dan untuk menentukan asal-usul air bocoran pada suatu bendungan. Teknik isotop alam adalah teknik yang cukup efektif, efisien, cukup terpercaya untuk memecahkan berbagai masalah yang berhubungan dengan hidrologi seperti telah dibuktikan melalui dua buah studi kasus yang disajikan dalam makalah. Dalam pekerjaan yang telah dilaksanakan dengan teknik isotop alam telah terbukti dapat mengidentifikasi asal usul air keluaran yang terdapat di sekitar bendungan Wlingi, Jawa Timur.
2. Dalam penelitian ini, seluruh air keluaran yang terdapat disekitar bendungan Wlingi telah dikumpulkan dan dianalisis. Dari interpretasi hasil analisis contoh di simpulkan air

keluaran yang terdapat disekitar bendungan berindikasi kuat merupakan air bocoran atau resapan dari waduk. Selain itu, lokasi bocoran pada bendungan Ngancar, Jawa Tengah telah dapat diidentifikasi dengan menggunakan teknik isotop buatan Au<sup>198</sup>. Hal ini menunjukkan bahwa teknik isotop dalam penyelesaian masalah kebocoran pada bendungan adalah sangat efektif, efisien, dan cukup akurat.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. IAEA, "Stable Isotope Hydrology; Deuterium and Oxygen-18 in Water Cycle," Technical Report series no. 210, IAEA, Vienna, (1981).
2. BEDMAR, A. P. and ARAGUAS, L., *Detection and Prevention of Leaks from Dams*, A.A. Balkema Publishers, Lisse, (2002).
3. ERIKSSON, E., "Stable Isotopes and Tritium in Precipitation," *Guide book on Nuclear Techniques in Hydrology*, Technical Report series no. 91, IAEA, Vienna, 19-34(1983).
4. DAGSTAN, "Studi Asal-USul Air Rembesan/Bocoran Waduk Jatiluhur, Wlingi, dan Ngancar dengan Teknik Isotop Alam," *Laporan akhir*, DAGSTAN, Jakarta, (1999).
5. DAVIS, S. N., THOMPSON, G. M., BENTLEY, H. W., STILES, G., "Groundwater Tracers - A short Review," *Ground Water*, v. 18, no. 1, 14 - 23 (1980).
6. DROST, W. AND MOSER, H., "Leakage from Lakes and Reservoirs," *Guide book on Nuclear Techniques in Hydrology*, Technical Report series no. 91, IAEA, Vienna, 177-186 (1983).
7. GHOSH, P. AND BRAND, W. A., "Stable Isotopes Ratio Mass Spectrometri in Global Climate Change Research," *International Journal of Mass Spectrometry*, v. 228, 1 - 33 (2003).
8. GLEICK, P. H., "Climate Change, Hydrologi, and Water Resources," *Reviews of Geophysics*, v. 27, no.3, 329-344 (1989).
9. SIDAURUK, P., "Pengaruh Proses Penguapan terhadap Perbandingan Kelimpahan Relatif Deuterium dan Oksigen-18 Dalam Air," *Skripsi Sarjana*, Fakultas MIPA-UNAS, Jakarta, (1987).